

## 考虑元件特性与物理约束的静态等值方法

张林<sup>1</sup>, 廖龙飞<sup>2</sup>, 余娟<sup>2</sup>, 朱黎丽<sup>3</sup>, 朱柳<sup>4</sup>, 颜伟<sup>2</sup>, 赵霞<sup>2</sup>

(1. 国家电网公司重庆市电力公司 重庆 渝中区 400014;

2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 沙坪坝区 400044;

3. 重庆工程职业技术学院电气工程学院 重庆 沙坪坝区 400037;

4. 国家电网长沙供电公司 长沙 410000)

**【摘要】**在难以获得外网实时同步信息,但又必须考虑外网对内网的影响时,采用基于边界处实时状态信息的非拓扑静态等值方法成为解决上述问题的有效途径。该文针对单端口互连电网提出考虑外网元件特性与参数物理约束的静态等值方法,外网对内网电压和功率的支撑作用通过外网中各元件的特性实现。因此,首先将外网主要元件特性尽可能全面地通过合理的等值参数保留在外网等值电路中,提出基于外网元件特性的单端口等值电路;然后,基于该等值电路和边界节点处的多时段实时状态信息建立量测方程,并在分析等值电路参数物理意义的基础上提出带约束的静态等值优化模型。在新英格兰39节点系统中验证了该方法所计算的等值参数符合实际物理意义,且能较大程度地提高静态安全分析精度。

**关键词** 元件特性; 物理约束; 电力系统; 静态等值; 电压和功率支撑

**中图分类号** TM7

**文献标志码** A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2015.05.013

## Static Equivalent Method Considering the Characteristics and Physical Constraints of Network Components

ZHANG Lin<sup>1</sup>, LIAO Long-fei<sup>2</sup>, YU Juan<sup>2</sup>, ZHU Li-li<sup>3</sup>, ZHU Liu<sup>4</sup>, YAN Wei<sup>2</sup>, and ZHAO Xia<sup>2</sup>

(1. State Grid Chongqing Electric Power Company Yuzhong Chongqing 400014;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University Shapingba Chongqing 400044;

3. Electrical Engineering College, Chongqing Vocational Institute of Engineering Shapingba Chongqing 400037;

4. State Grid Changsha Electric Power Supply Company Changsha 410000)

**Abstract** When the internal network is difficult to obtain the real-time synchronous information of the external network but has to consider its impacts, the non-topological static equivalent methods based on the real-time status information at the boundary bus become an effective way to solve the above problem. This paper presents a static equivalent method considering the characteristics of external network devices and the physical constraints on parameters for single-port interconnected power system. The voltage and power of internal network is supported by the external network with its devices. The characteristics of main devices in external network remain unchanged as much as possible in the external network equivalent circuit through reasonable equivalent parameters, and a single-port equivalent circuit based on the external network device characteristics is proposed. The measurement equations based on the equivalent circuit and the multi-period real-time status information at the boundary bus is established and the static equivalent optimization model with the constraints is presented by analyzing the physical meaning of the equivalent circuit parameters. The New England 39-bus system is used to verify the effectiveness of the presented method.

**Key words** device characteristics; physical constraints; power system; static equivalent; voltage and power support

互连电网中对内网进行研究分析时,有必要考虑与之紧密联系的外网对内网的影响<sup>[1]</sup>。由于电力市场的竞争关系以及电网分层分区的运行管理特

点,内网一般只能获取外网的典型运行方式数据,如大方式和小方式运行数据,而难以获取外网的实时同步运行数据<sup>[2-3]</sup>,给全网一体化分析带来困难。

收稿日期: 2014-04-30; 修回日期: 2015-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(51477017); 重庆市基础与前沿研究计划一般项目(cstc2014jcyjA90017); 中央高校基本科研业务费(CDJZR13150008)

作者简介: 张林(1975-),男,博士,高级工程师,主要从事电力系统调度运行、安全控制及风险评估、故障分析方面的研究。

对此, 非拓扑静态等值方法在外网实时同步运行数据未知的情况下计算外网等值参数, 进行一体化分析以保留外网对内外的影响, 如挂等值机法<sup>[4]</sup>和戴维南等值法<sup>[5-7]</sup>, 基于Ward等值电路或REI等值电路的方法<sup>[3,8-10]</sup>。上述方法可分为单端口和多端口两类, 本文研究对象为前者。这类方法, 特别是戴维南等值法, 已广泛应用于内网稳态分析<sup>[5-7]</sup>中。在这些应用中, 不精确或者不恰当的非拓扑静态等值方法在电力系统分析中会产生较大的误差甚至错误的计算结果<sup>[11-12]</sup>, 一个精确有效的非拓扑静态等值方法应尽可能地考虑如下两个因素。

### 1) 外网元件特性的全面性。

外网对内网电压和功率的支撑作用主要通过线路、变压器、发电机、负荷以及无功补偿装置等元件实现, 而这些元件有着截然不同的特性。因此, 需要将这些元件的不同特性通过等值参数保留在外网等值电路中, 而现有单端口等值电路均没有全面考虑外网元件的特性<sup>[5-7,11-12]</sup>, 影响了其等值的有效性和精确性。

### 2) 外网等值参数的物理约束。

外网等值参数的合理性和准确性是单端口非拓扑静态等值方法得到有效应用的关键<sup>[7,10]</sup>。为解决上述问题, 文献[10]提出考虑了电阻、电抗的一般物理约束, 电阻和电抗均大于0, 电抗大于电阻; 文献[7]提出电阻、电抗的上下限约束, 但未给出其上下限取值方法。以上方法还存在约束范围宽泛, 上下限取值困难的问题, 所以仍有等值参数不合理和不准确的情况。因此, 在单端口非拓扑静态等值方法中需进一步研究更为有效的等值参数物理约束。

针对上述问题本文做出如下研究: 首先通过合理的等值参数将外网元件的特性保留在外网等值电路中, 提出基于外网元件特性的单端口等值电路; 基于该等值电路、边界节点处的多时段实时状态信息和外网的典型运行方式数据, 建立了等值参数的量测方程和物理约束, 从而提出带约束的静态等值优化方法; 最后, 利用新英格兰39节点系统分析本文等值参数的合理性和准确性。

## 1 考虑外网元件特性的单端口等值电路设计

在单端口互联电网中, 外网通过单个边界节点与内网紧密相联。由于外网通常包含了发电机、线路、变压器、负荷以及无功补偿装置等元件, 外网对内网的电压和功率支撑作用均通过这些元件实

现, 而这些元件有着截然不同的特性。因此, 需要将这些元件的不同特性尽可能全面地保留在单端口等值电路中, 以充分反映外网对内网的影响。为此, 本文提出考虑外网元件特性的单端口外网等值电路, 如图1所示。

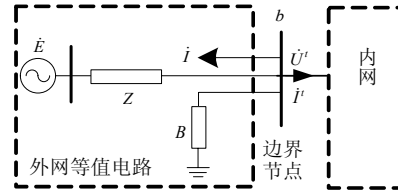


图1 考虑外网元件特性的单端口等值电路

在图1中,  $\dot{U}'$ 和 $\dot{I}'$ 分别代表第 $t$ 个时段边界节点处的实时状态信息: 边界节点电压相量和注入内网的等效电流相量。外网等值电路包含了如下4类等值元件: 等值电压源、等值阻抗支路、等值注入电流、等值对地支路, 它们是考虑外网元件特性全面性的具体体现, 其作用如下:

1) 等值电压源是对外网发电机的等值, 其所在母线电压用等值参数 $\dot{E}$ 表示。等值电压源在潮流计算中作为PV节点, 被用于模拟外网发电机对边界节点及内网的电压和功率支撑作用。

2) 等值阻抗支路, 其等值参数为 $Z$ , 是对外网线路/变压器的等值。在实际电力系统中, 线路/变压器的主要作用是功率的输送和分配, 其特性可通过阻抗参数 $Z$ 保留在外网等值电路中。

3) 等值注入电流, 用等值参数 $\dot{I}$ 表示, 是对外网负荷在边界节点 $b$ 处的等值。负荷是外网中的重要元件, 将其特性保留在外网等值电路中, 有助于提高静态等值精度。

4) 等值对地支路电纳, 其等值参数为 $B$ , 表征原外部网络中各种对地支路在边界节点 $b$ 处的等值, 包括线路/变压器模型中的对地支路、并联电容器和并联电抗器等。

综上, 在外网等值电路中有必要将外网中各主要元件的特性通过以上等值元件保留在等值电路中, 以全面反映外网对内网的电压和功率支撑。

## 2 考虑等值参数物理约束的静态等值优化方法

本文基于等值电路、边界处多时段实时状态信息和外网典型运行方式数据, 分别建立待求等值参数的量测方程和物理约束, 并进一步提出带约束的静态等值优化模型及其求解流程。

## 2.1 等值参数量测方程

基于边界处实时状态信息较易获得边界节点电压和内网等效注入电流,如图1中所示 $\dot{U}'$ 、 $\dot{I}'$ 。在边界节点 $b$ 处应用KCL,有:

$$\frac{\dot{E} - \dot{U}'}{Z} = \dot{I}' + \dot{I} + jB\dot{U}' \quad (1)$$

式中,  $j$ 是虚数的符号。

将式(1)左右两边同乘 $Z$ ,移项并将各复数按实部和虚部展开,等式两端的实部和虚部分别相等,可以得到如下量测方程:

$$f_1'(\mathbf{x}) = E_{\text{Re}} - U_{\text{Re}} - R(I_{\text{Re}}' + I_{\text{Re}} - BU_{\text{Im}}') + X(I_{\text{Im}}' + I_{\text{Im}} + BU_{\text{Re}}') = 0 \quad (2)$$

$$f_2'(\mathbf{x}) = E_{\text{Im}} - U_{\text{Im}} - R(I_{\text{Im}}' + I_{\text{Im}} + BU_{\text{Re}}') - X(I_{\text{Re}}' + I_{\text{Re}} - BU_{\text{Im}}') = 0 \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{x} = [R, X, E_{\text{Re}}, E_{\text{Im}}, I_{\text{Re}}, I_{\text{Im}}, B]^T$ , 下标“Re”和“Im”分别代表了各变量的实部和虚部。

## 2.2 等值参数物理约束

本节利用外网典型运行方式数据,借助优秀的拓扑法<sup>[13]</sup>计算外网等值参数的典型值,并提出等值参数物理约束的建立方法。

在静态等值的拓扑法领域,获得符合实际物理意义的外网等值参数,可通过外网的详细信息,如拓扑结构、电力元件参数及运行状态等数据计算得到。而在非拓扑法领域,虽然内网无法获得外网的实时同步数据,但可获得外网典型运行方式下的拓扑结构、电力元件参数及运行状态。因此,可基于外网典型运行数据,结合本文等值电路的特点,采用现有拓扑法计算得到物理意义明确的外网等值参数的典型值,且这些典型值能够较为准确地反映外网元件在典型运行方式下的运行状态,进而利用该等值参数典型值建立合理、有效的等值参数上下限约束。

现利用外网的大方式和小方式典型运行数据,采用文献[13]中方法计算本文外网等值电路中的等值阻抗 $Z$ 、等值负荷电流幅值 $I$ 和等值对地电纳 $B$ 的典型值,即获得大、小方式下的两组外网等值参数向量为:

$$\mathbf{x}'_{\text{bom}} = [R_{\text{bom}}, X_{\text{bom}}, I_{\text{bom}}, B_{\text{bom}}] \quad (4)$$

$$\mathbf{x}'_{\text{som}} = [R_{\text{som}}, X_{\text{som}}, I_{\text{som}}, B_{\text{som}}] \quad (5)$$

式中,下标bom代表大方式,som代表小方式。

根据继电保护的知识,大方式下外网的负荷水平较高,发电机、线路、变压器等设备一般大量投运,此时外网的负荷节点与发电机节点之间的等值阻抗最小,外网负荷电流幅值最大,对地电纳最大。小方式下外网的负荷水平较低,外网中部分设备退

出运行,此时外网的负荷节点与发电机节点之间的等值阻抗最大,外网负荷电流幅值最小,对地电纳最小。根据上述关系可建立外网等值参数 $R$ 、 $X$ 、 $I_{\text{Re}}$ 、 $I_{\text{Im}}$ 、 $B$ 的物理约束为:

$$\begin{cases} R_{\text{bom}} \leq R \leq R_{\text{som}} \\ X_{\text{bom}} \leq X \leq X_{\text{som}} \\ I_{\text{som}} \leq \sqrt{I_{\text{Re}}^2 + I_{\text{Im}}^2} \leq I_{\text{bom}} \\ B_{\text{som}} \leq B \leq B_{\text{bom}} \end{cases} \quad (6)$$

## 2.3 带约束的静态等值优化模型的建立与求解

由于等值参数的物理约束来源于等值参数的典型值,但考虑到外网的当前运行方式较外网的典型运行方式有较大变化的情况,当前运行方式下的外网等值参数可能不在物理约束的范围内。此时可在外网等值阻抗、等值负荷电流幅值的典型值上扩大或缩小一定比例,以保证所设置的物理约束能够包含当前外网等值参数的实际解。在式(6)中各不等式的两边乘以柔性系数向量 $\alpha$ 和 $\beta$ ,其中各个量可分别在0.8~1.0和1.0~1.2中取值,柔性系数的具体取值可在等值参数计算中进行调整。另外,根据发电机机端电压的调压要求对等值电压源电压幅值 $E$ 的取值限定在 $[E_{\text{min}}, E_{\text{max}}]$ 。

结合上述分析及等值参数的量测方程和物理约束,即式(2)、式(3)和式(6),可建立等值参数物理约束的单端口非拓扑静态等值优化模型为:

$$\begin{cases} J = \min \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^2 (f_i'(\mathbf{x}))^2 \right) \\ \text{s.t. } \alpha_1 R_{\text{bom}} \leq R \leq \beta_1 R_{\text{som}} \\ \alpha_2 X_{\text{bom}} \leq X \leq \beta_2 X_{\text{som}} \\ \alpha_3 I_{\text{som}} \leq \sqrt{I_{\text{Re}}^2 + I_{\text{Im}}^2} \leq \beta_3 I_{\text{bom}} \\ \alpha_4 B_{\text{som}} \leq B \leq \beta_4 B_{\text{bom}} \\ E_{\text{min}} \leq \sqrt{E_{\text{Re}}^2 + E_{\text{Im}}^2} \leq E_{\text{max}} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\alpha_j \in \alpha$ ,  $\beta_j \in \beta$ ,  $j=1,2,3,4$ 。

待求变量 $\mathbf{x}$ 包含3个等值元件参数( $R, X, B$ )和4个等值元件状态( $E_{\text{Re}}, E_{\text{Im}}, I_{\text{Re}}, I_{\text{Im}}$ )。由式(2)和式(3)可知,独立量测方程数始终小于待求变量数。本文采用多时段的实时状态信息求解该模型,假设在多个时段间隔内外网等值元件参数近似不变的要求,而等值元件状态可能变化,但在等值精度允许范围内,仍然可将其作为常数进行估计。综合考虑等值参数的可估性和等值精度,取 $m=4$ ,并运用内点法对上述模型求解。等值参数求解的具体流程如图2所示,其中变量初值可根据外网典型参数进行选取,如取上下限的平均值。

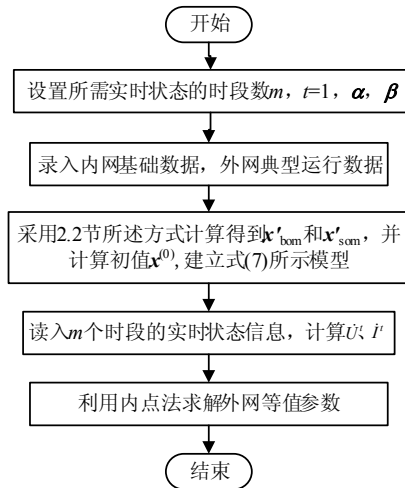


图2 带约束静态等值优化模型的求解流程

### 3 有效性验证

#### 3.1 算例描述

为验证本文方法的有效性, 选择本文方法、无约束方法、戴维南等值法<sup>[5]</sup>、挂等值机法<sup>[4]</sup>进行对比分析。无约束方法是在本文方法的基础上去掉所有约束, 其他环节保持不变; 戴维南等值法中考虑了电阻、电抗的一般物理约束。现利用新英格兰39节点系统对上述方法进行等值参数的全面性和合理性分析以及静态安全分析。

以新英格兰39节点系统中的节点16为边界, 节点19、20、21、22、23、24、33、34、35、36为外网, 其余节点为内网形成单端口的互联电网算例。假定全网负荷以及发电机有功出力按照0.15%的步长递增, 然后分别进行全网潮流计算获得多个时段的状态信息。并通过增减发电机出力、增减负荷、投切线路和无功补偿装置等措施形成该系统的大方式和小方式典型运行数据。

#### 3.2 评价指标

定义相对误差 $e_r$ 和安全误差 $e_s$ 这两个能够反映外网等值精度的指标分别为:

$$e_r = \left| \frac{x - x^{eq}}{x} \right| \times 100\% \quad (8)$$

$$e_s = \left| \frac{x - x^{eq}}{S_{base}} \right| \times 100\% \quad (9)$$

式中,  $x$ 和 $x^{eq}$ 分别代表真值和估计值, 真值是在仿真条件下, 内外均采用详细模型的全网潮流计算值, 而估计值是在内网采用详细模型, 外网采用等值模型下的全网潮流计算值;  $S_{base}$ 表示系统基准功率, 本文算例中 $S_{base}=305$  MVA。

### 3.3 数据分析

1) 外网元件特性全面性和等值参数合理性分析。

现利用本文方法以及上述方法对本文算例的外网进行等值参数计算, 如表1所示。从表中可以看出本文方法通过4类等值元件对外网元件进行等值且等值参数最为合理; 无约束方法计算的等值电阻小于0, 且等值负荷为发出有功, 不具备合理性。此外, 戴维南等值法和挂等值机法缺乏对外网元件特性的全面反映。

表1 不同非拓扑静态等值方法的等值参数比较 pu

方法	$R$	$X$	$E_{Re}$	$E_{Im}$
本文方法	0.000 7	0.014 0	1.07	0.06
无约束方法	-0.052 9	0.012 7	0.84	0.43
戴维南等值法	0.002 4	0.022 5	1.10	0.03
挂等值机法	—	—	—	—

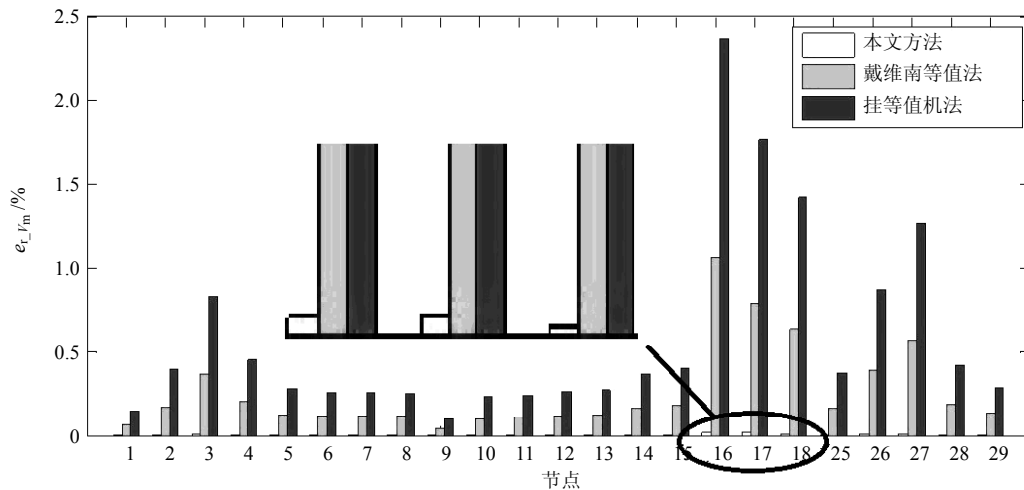
方法	$I_{Re}$	$I_{Im}$	$B$
本文方法	6.53	-1.90	1.79
无约束方法	-1.58	-4.83	-2.21
戴维南等值法	—	—	—
挂等值机法	7.72	-2.41	-

2) 静态安全分析。

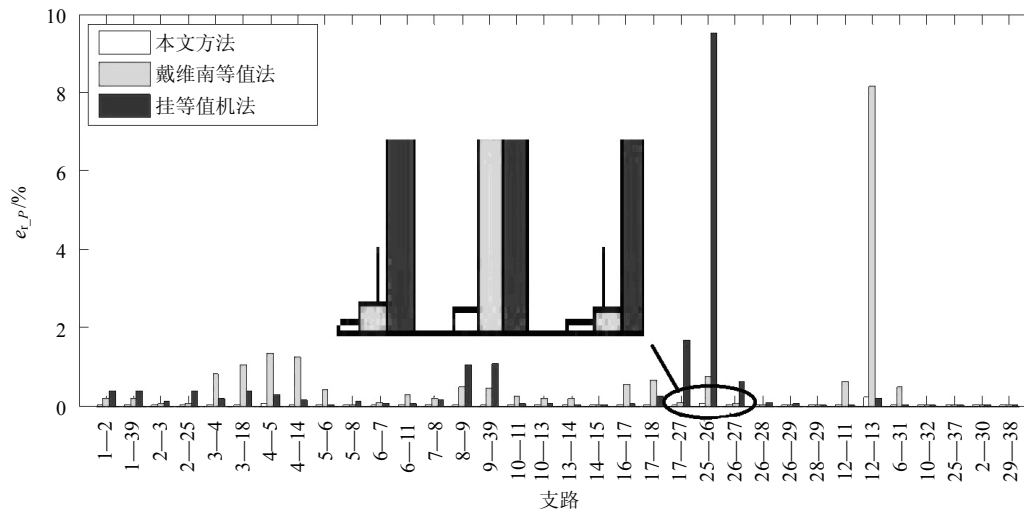
在本文算例中进行线路或发电机开断, 分析等值前后内网潮流的相对误差和安全误差。在开断内网支路15-16的情况下, 内网潮流的相对误差及其安全误差如图4a~图4e所示。可以看出, 本文方法的误差明显小于其他两种方法, 如图4c中挂等值机法为273.23%, 戴维南等值法为121.99%, 本文方法仅为2.59%; 图4e中挂等值机法为25.52%, 戴维南等值法为11.39%, 而本文方法仅为0.24%。

表2列出了在内网中不同支路或发电机开断的情况下各方法的评价指标最大值。由表2可见本文方法的相对误差和安全误差最小, 其等值精度均要高于其他两种方法。根据3.2节对相对误差的定义可知本文方法的估计值非常接近真值, 证明了本文方法的正确性, 而其他两种方法的相对误差较大, 偏离了真值。如当开断支路16-17时, 各方法支路无功潮流的相对误差最大值分别为: 挂等值机法289.21%, 戴维南等值法106.91%, 本文方法仅2.08%。

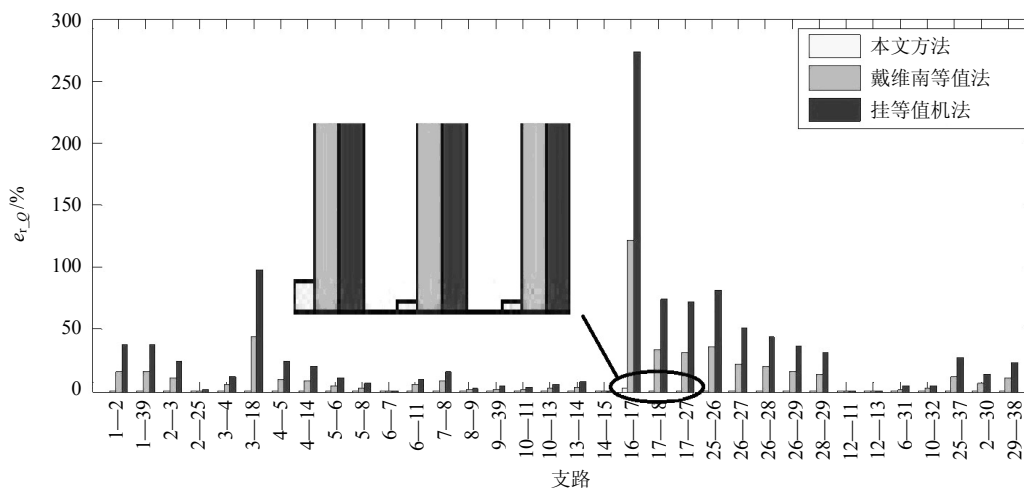
综上所述, 本文方法能较为全面地反映外网主要元件的特性, 所计算的等值参数更加合理有效, 能够在内网运行方式发生较大变化后为其提供适当的电压和功率支撑, 等值精度明显提高。



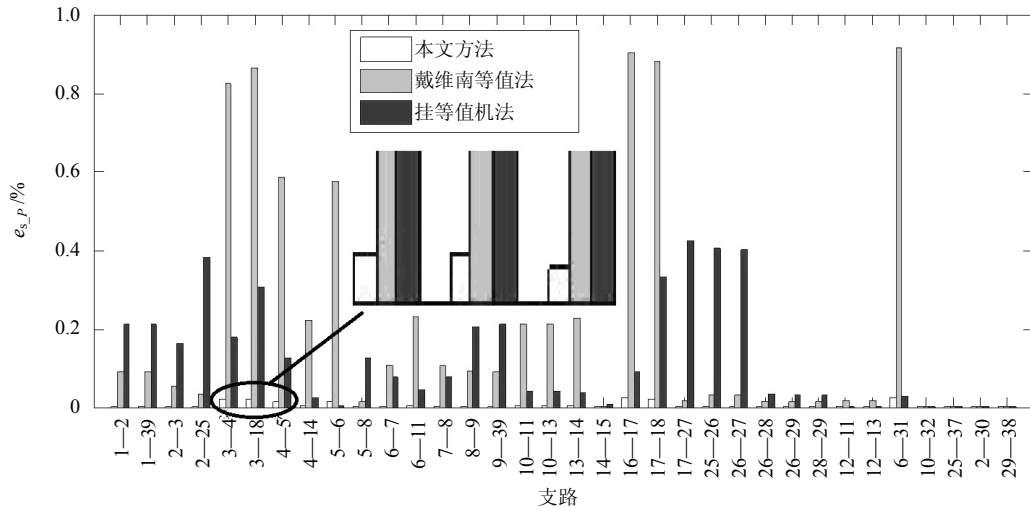
a. 节点电压幅值的相对误差  $e_{r,V_m}$



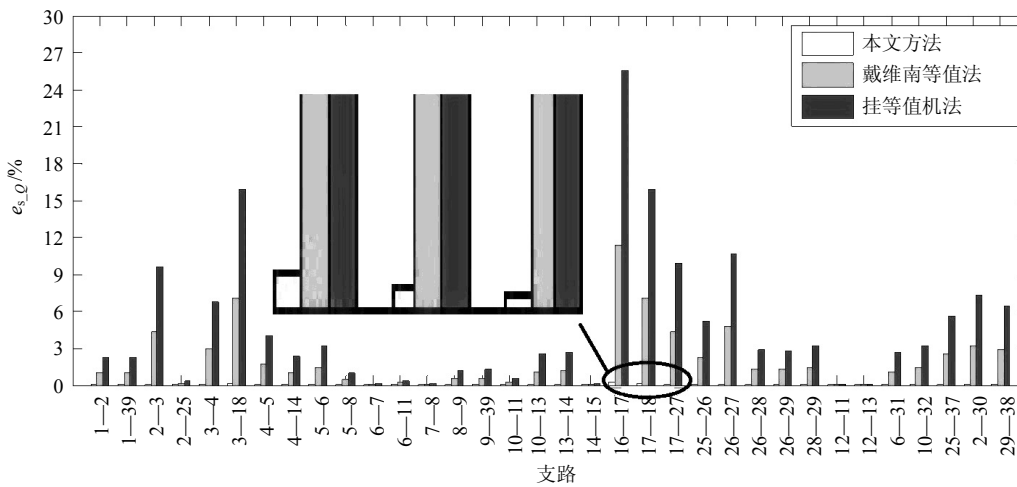
b. 支路有功潮流的相对误差  $e_{r,P}$



c. 支路无功潮流的相对误差  $e_{r,Q}$



d. 支路有功潮流的安全误差  $e_{s_p}$



e. 支路无功潮流的安全误差  $e_{s_Q}$

图4 不同非拓扑静态等值方法的各评价指标值

表2 内网元件开断时各评价指标最大值 %

条件	方法	$e_{r_{vm}}$	$e_{r_p}$	$e_{r_Q}$	$e_{s_p}$	$e_{s_Q}$
开断支路16-17	本文方法	0.01	0.04	2.08	0.01	0.08
	戴维南等值法	0.61	0.57	106.91	0.33	4.33
	挂等值机法	1.64	2.69	289.22	0.15	11.71
开断机组32	本文方法	0.02	0.61	1.43	0.02	0.17
	戴维南等值法	0.83	16.66	7.21	0.64	7.21
	挂等值机法	1.64	0.26	59.06	0.26	14.47
开断机组38	本文方法	0.03	0.30	21.14	0.04	0.21
	戴维南等值法	1.29	12.51	879.95	1.19	8.94
	挂等值机法	2.62	39.55	1772.55	1.07	18.01

## 4 结论

本文方法能够较为全面地反映外网主要元件的特性, 进而准确地模拟实际外网对内网的电压和功

率支撑作用, 提高了静态安全分析的精度。本文方法仅适用于单端口的非拓扑静态等值, 因此本文后续的研究工作是根据本文的研究思路对多端口的非拓扑静态等值方法展开深入研究, 以提高非拓扑静

态等值方法的工程实用性。

### 参 考 文 献

- [1] 余娟, 张勉, 朱柳, 等. 考虑灵敏度一致性的外网静态等值新理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 64-70.  
YU Juan, ZHANG Mian, ZHU Liu, et al. New theory on external network static equivalent based on sensitivity consistency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 64-70.
- [2] POON K K Y, EMAMI R, BOSE A, et al. External data exchange issues for state estimation in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 849-856.
- [3] 余娟, 朱柳, 颜伟, 等. 基于内网实测信息的多端口外网静态等值方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 32-37.  
YU Juan, ZHU Liu, YAN Wei, et al. Multi-port external network static equivalent on the basis of internal network measured information[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 32-37.
- [4] 张海波, 张伯明, 王俏文, 等. 不同外网等值模型对EMS应用效果影响的试验研究[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 1-6.  
ZHANG Hai-bo, ZHANG Bo-ming, WANG Qiao-wen, et al. A test investigation on effect of different external network equivalent models on EMS applications[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 1-6.
- [5] VU K, BEGOVIC M M, NOVOSEL D, et al. Use of local measurements to estimate voltage-stability margin[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1029-1035.
- [6] 刘明松, 张伯明, 姚良忠, 等. 基于PMU和改进戴维南等值模型的电压稳定在线监视[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 6-10.  
LIU Ming-song, ZHANG Bo-ming, YAO Liang-zhong, et al. Online voltage stability monitoring based on PMU and improved Thevenin equivalent model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 6-10.
- [7] 刘道伟, 韩学山, 任玲玉, 等. 基于轨迹灵敏度的戴维南等效参数迭代优化辨识[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(S1): 37-42.  
LIU Dao-wei, HAN Xue-shan, REN Ling-yu, et al. Identification of Thevenin equivalent parameters using iterative optimization approach based on the trajectory sensitivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(S1): 37-42.
- [8] 颜伟, 李世明, 陈俊, 等. 基于内网实测信息的两端口外网静态等值参数估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 101-106.  
YAN Wei, LI Shi-ming, CHEN Jun, et al. Parameter estimation for two-port external network static equivalent model on the basis of internal network measured information[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 101-106.
- [9] 李智, 杨洪耕. REI等值和变距线性回归在地区电网电压无功优化控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 18-22.  
LI Zhi, YANG Hong-geng. Application of REI equivalent and varying-intercept linear regression in voltage and reactive power optimization control in regional power grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 18-22.
- [10] 郭文鑫, 李世明, 朱柳, 等. 考虑量测误差计及等值参数物理约束的外网静态等值方法[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 216-221.  
GUO Wen-xin, LI Shi-ming, ZHU Liu, et al. A method for static equivalence of external network considering measurement error and physical constraints of equivalent parameters[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 216-221.
- [11] 李卫星, 牟晓明, 李志民. 电力系统戴维南等值参数的解析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(S1): 28-34.  
LI Wei-xing, MOU Xiao-ming, LI Zhi-min. Analysis and thoughts on the thevenin equivalent parameters for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(S1): 28-34.
- [12] WANG Yun-fei, PORDANJANI I R, LI Wei-xing, et al. Voltage stability monitoring based on the concept of coupled single-port circuit[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2154-2163.
- [13] YU J, ZHANG M, LI W Y. Static equivalent method based on component particularity representation and sensitivity consistency[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2400-2408.

编辑 漆蓉